



消波塊型地震超材料 設計及減震效果 模擬分析

王聖翔／國立成功大學土木工程研究所 碩士生

蘇于琪*／國立成功大學土木工程研究所 副教授

目前地震工程的隔減震技術多針對單一建築進行加固與消能，例如加強結構的強度與韌性、在底部使用隔震支承、利用消能元件吸收震動能量等。近十年來，以波傳與複合材料角度切入的地震超材料 (Seismic Metamaterial, SM) 研究在國外逐漸興起，其特色在於地震超材料的減震不需接觸建築物本身，而在社區外圍建立屏障阻隔特定頻段的地震波，此方法對於具有大量老舊建築的台灣特別適用。因此，本文針對地震超材料的設計進行研究。文獻上現有的地震超材料多使用特殊的幾何與材料，常面臨昂貴成本導致實際應用的困難。本研究以常見的土木材料－混凝土、消波塊體、圓板與半球為元素，組合出新穎的消波塊型地震超材料，透過頻散分析與全域暫態模擬，驗證此設計對地震表面波的衰減效果。

關鍵詞：地震超材料、隔減震技術、消波塊、地震工程、暫態分析

研究背景

台灣位於環太平洋地震帶，每年都會發生數萬次地震^[1]，過去數十載中也造成許多嚴重災害，如1999年集集大地震、2016年高雄美濃地震、2018年花蓮地震等，其產生的地表破裂、土壤液化、土木構造物損壞等，皆造成人民的生命安全威脅與經濟損失，因此如何減少地震造成的影響為一重要課題。地震波大致可分為體波 (Bulk Waves) 與表面波，表面波又為造成地震災害的主因。目前在土木工程中常見的隔減震技術如安裝側向支撐、被動式調質阻尼器 (Passive Tuned Mass Damper) 或主動式調質阻尼器 (Active Tuned Mass Damper) 等^[2,3]，其原理在於增加土木結構物之側向勁度或是消能系統，然而這些設備皆必須安裝於土木構造物內部，對於某些老舊或是不易安裝的構造物有實行上的困難。

近十年來，學界發展一種新型的隔減震技術—地震超材料 (Seismic Metamaterial, SM)，其利用幾何結

構或是材料間的差異性，在不與結構物本身接觸的情況下，透過週期性排列的地震超材料包圍結構物，形成地震保護帶^[4-6]。如圖1所示，若在欲保護的社區外圍圍一圈地震超材料，即藍色標示的地震保護帶，其可以不接觸建築物本體的方式，達到阻隔地震波的目標。目前各國的先進模擬與試驗，皆證實地震超材料可使地震波發生偏轉，或是由地震超材料吸收地震波的能量，具備成為新的隔減震技術之潛力。

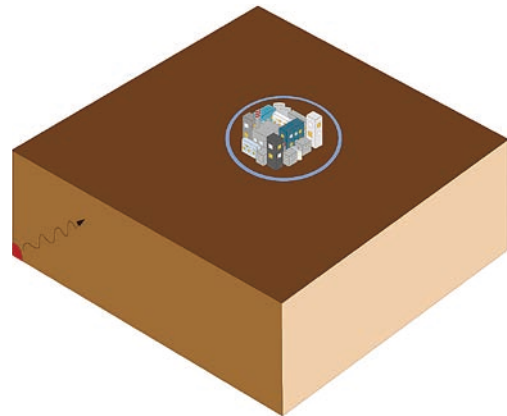


圖1 社區外圍圍一圈地震超材料 (藍色) 保護社區示意圖

* 通訊作者，yuchisu@gs.ncku.edu.tw

地震超材料減震原理

地震超材料的減震原理為局部共振，即地震波在特定頻段內，通過局部共振器之共振，與主系統產生反向運動，降低主系統的動態響應，從而阻止地震波的傳播。其中地震波無法通過的頻段被稱為「帶隙 (Bandgap) [7]」。

此一局部共振器的概念，類似於台北 101 大樓的諧調質量阻尼器 (Tuned Mass Damper)，利用諧調阻尼器的局部共振，來降低主系統的反應。但地震超材料與協調阻尼器的不同在於地震超材料並不接觸建築結構本身，其主系統為土體，地震超材料本身為局部共振器，利用設計局部共振器，在欲保護的建築外圍設置地震保護屏障。也由於地震超材料不需接觸建築結構，其相較於諧調阻尼器的減震有四個優勢：(1) 地震超材料並不附著於主建築物，因此其質量大小並無限制，進而可達到相較諧調阻尼器更寬、更低頻的減震頻段。(2) 地震超材料設置於保護建築的外圍，維修與替換容易。(3) 地震超材料可針對老舊建築以非侵入的方式進行減震，相當適合在台灣發展。最後，(4) 地震超材料的保護對象不限於單一建築物，可保護一整個既有社區。

地震波的種類

若將地球整體視為一個巨大的球形固體，地震波可分為在固體中傳遞的體波 (Body Waves)，以及在固體表面傳遞的表面波 (Surface Waves)。依照質點運動方向與波傳方向的不同，體波可分為 P 波與 S 波。如圖 2 所示，P 波為固體上的質點運動方向與波傳方向平行，而 S 波為質點運動方向與波傳方向垂直。表面波亦分為質點運動方向在波傳垂直面的 Rayleigh 波，以及質點運動方向質點在波傳水平面的 Love 波。

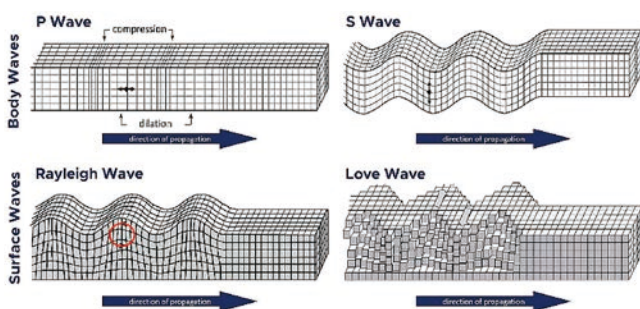


圖 2 地震波種類 [8]

若將地殼單獨取出分析，其可視為一個薄板，而在此薄板上傳遞的波，稱為板波。板波與體波、表面波的不同在於其有明顯的邊界效應。因此，在數值模擬時，若欲針對體波或表面波，建立模型時會採用足夠大的固體，甚至施加低反射邊界以去除邊界效應。但若欲模擬板波，模型則會使用足夠小的厚度，而使厚度方向形成駐波。依照質點運動的類型，板波又分為 Lamb 波與 SH 波，如圖 3 所示，左邊與中間的圖為 Lamb 波，觀察此二圖板上下表面的質點，其運動方向為反對稱與對稱模態，此為 Lamb 波的兩種型式。而最右邊的圖為板的 SH 波。

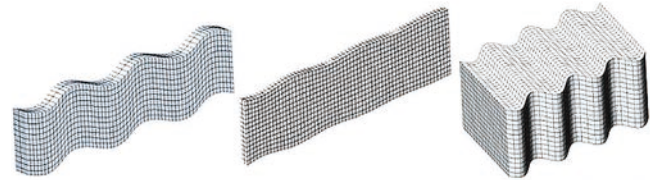


圖 3 Lamb 波 [9]

在地震超材料的研究中，多針對將地球整體視為一個固體的 Rayleigh 波，以及針對地殼的 Lamb 波作分析，尚未出現單一地震超材料即可阻隔所有地震波的設計。本研究亦專為阻隔 Rayleigh 波所提出的地震超材料設計。

Rayleigh 波由 P 波與 S 波互相干涉所產生，質點在地表垂直面上則呈現橢圓形震動。由於 Rayleigh 波具有低頻率、長波長、大振幅且不易隨著地表傳遞距離而衰減等特性，容易對於結構造成嚴重災害。為模擬 Rayleigh 波，我們施加 z 方向的面外點位移，另外，為使點位移產生的體波與 Rayleigh 波解耦，我們透過增加模型的深度以及拉長波源與接收點的位置，以確保傳播至接收點的波為 Rayleigh 波。

關於地震超材料的文獻回顧

地震超材料可分為四種類別 [10]：土壤設計型 (Seismic Soil Metamaterials)、埋入型共振器 (Buried Mass Resonators)、地上型共振器 (Above Surface Resonators) 以及拉脹材料 (Auxetic Materials)。事實上，類似地震超材料的波阻隔概念最早可追溯至 1970 年，Richart 等人 [11] 提出利用單排或多排的圓形孔洞阻擋地震波的構想。2011 年，Alagoz [12] 提出將聲子晶體尺寸放大至常見的土木工程材料尺寸，並以時域有限差分法模擬證實「帶隙」的存

在。2014年，Finocchio等人^[13]提出以碗型結構內部放置質量塊的地震超材料設計，並將其埋入土壤。他們證實此設計產生的局部共振可形成等效負質量，進而達到衰減地震S波的效果。2015年，Yan等人^[14]建立鋼筋混凝土包覆橡膠與鋼塊的單元，並以三維週期性排列成結構基礎，以有限元素分析證實其可有效衰減低頻率的P波與S波造成的地表結構加速度。

在2016年，Colombi等人^[15,16]利用光學折射的原理提出從1 m到14 m高度漸增或是漸減的地震超材料設計，使地震表面波的波傳方向偏轉，轉而成為剪力波，並以原始森林為例，利用實驗與數值模擬驗證表面波轉換為剪力波的機制。同年，Miniaci等人^[17]提出挖空十字的土壤設計型地震超材料，以及在土壤中埋入橡膠與混凝土圓柱的埋入型共振器，分別以不同的深度、圓柱半徑及材料係數，探討其對帶隙範圍的影響，並以Abaqus模擬暫態反應驗證衰減效果。同年，Palermo等人^[18]提出在土壤中埋入混凝土空心圓柱，並於內部安置市售橡膠墊與鋼圓柱的埋入型共振器。藉由不同的材料參數進行數值模擬，他們驗證其設計可提供5~7 Hz的帶隙。他們亦將提出的地震超材料以三角形週期性排列組成一維陣列，以暫態模擬驗證其效果，發現其可衰減約60%的地表位移，並透過輸入5 Hz的簡諧波探討增加陣列數目對衰減率的影響。同年，Achaoui等人^[19]提出利用橡膠連接半徑0.74 m的鋼球組成的1立方公尺正立方體單元，將其排列成三維週期性結構，並置於保護物基礎的下方，以數值模擬驗證其可提供8~49 Hz的帶隙。

在2017年，D'Alessandro等人^[20]提出類簡支梁受集中載重的地震超材料設計。同年，Du等人^[21]以空心圓鋼樁、空心方鋼樁及空心方鋼樁內部填充混凝土，以二維週期性排列分別埋入土壤中建立邊長10公尺、深度20公尺的單元，並由數值模擬驗證可阻擋8~20 Hz的Lamb波，並在頻域發現以80個單元組成的陣列可達有效衰減。同年，Achaoui等人^[22]提出若將鋼製的地震超材料埋入土壤與打入岩盤中，可有效抵禦地震表面波，並提供起始於0 Hz的低頻寬帶隙。他們利用數值模擬驗證，若使用直徑1.2公尺、深度15公尺的鋼圓柱，以間距2公尺的正方形二維週期性排列埋入土壤，並打入深度5公尺的岩盤中，其可提供0~4.5 Hz的帶隙。此外，若將鋼的圓形斷面改為十字形，則可以提供0~26 Hz的帶隙。

在2018年，Zeng等人^[23]提出了於土壤表面放置I型鋼柱的地表共振器地震超材料，藉由數值模擬驗證其設計可以有效阻擋地震表面波，並提供6.2~8.2 Hz及10.7~13.0 Hz的帶隙。同年，Du等人^[24]提出在土壤表面放置H型鋼的地上型共振器，並以H型鋼為基礎在翼板處向外連接較小的H型鋼，以數值模擬驗證其可以提供0.35~0.6 Hz及6.8~12.0 Hz的帶隙。同年，Cheng與Shi^[25]提出在建築物的基礎加入垂直向與水平向的週期性局部共振器地震超材料，發現其設計除可以有效抵禦表面波，亦能大幅減少保護物的垂直及水平向位移。藉由輸入簡諧波與地震歷時加速度，以數值模擬探討加入地震超材料後，對建築物的垂直及水平加速度的衰減。同年，Pu與Shi^[26]探討中國上海當地分層土壤的參數對地震超材料的影響，指出表面波的傳遞主要由第一層土壤控制。他們亦以常見的土木材料所構成的圓樁埋入分層土壤中，並個別對埋入深度、圓樁半徑、波源距離、單元晶格的長寬比進行參數分析，發現當長寬比增加時，帶隙有上限會降低；圓樁半徑增加時，帶隙上限會增高；埋入深度增加則衰減程度會增加，但會趨於平緩；波源距離對衰減程度無明顯效果。

在2019年，Chen等人^[27]提出將圓鋼樁打入楊氏係數比為1:20:400，且厚度皆為2公尺的分層土壤中，發現楊氏係數較大的土壤可以與鋼柱互相約束，進而使帶隙的頻率下降。同年，Zeng等人^[28]將橡膠包覆鋼樁埋入土壤中，並分別以Lamb波與Rayleigh波進行數值模擬。結果發現當以邊長1.5公尺、深度4.5公尺的橡膠包覆邊長1.35公尺、深度4.2公尺的鋼樁，其可阻擋3.5~10 Hz的Lamb波及Rayleigh波。同年，Muhammad等人^[29]提出利用I型鋼樁互相垂直交疊與在翼板處加厚的設計理念，以數值模擬分析將地震超材料在放置單一土壤與分層土壤表面的帶隙差異。結果發現，分層土壤的帶隙相對於單一土壤可以提供較大的帶寬。他們也在時域上輸入簡諧波，驗證帶隙內的地震波經過此地震超材料後，表面位移衰減超過50%。同年，Muhammad與Lim^[30]提出以兩片鋼板夾住橡膠墊的局部共振地震超材料，並嵌入薄混凝土中的地震超材料設計。他們發現帶隙可由布拉格散射產生的擬帶隙(Pseudo Badgap)，以及由局部共振產生的完全帶隙組成。2020年，李冠慧等人^[31]針對921地震提出對應相對高頻與低頻地震的地震超材料單元結構，並以有限元

素分析評估其在帶隙頻率的減震效益。Zeng 等人^[32]以俄羅斯娃娃的概念，提出最外層為空心鋼圓柱，往內交互包覆同心橡膠圓柱及鋼圓柱，並放置土壤表面的地上型共振器。根據數值模擬，當交互層數增加時帶隙有下降的趨勢，其中三層阻擋 5.29 ~ 6.95 Hz、7.12 ~ 10.80 Hz 及 10.90 ~ 13.10 Hz 的 Rayleigh 波。

在 2021 年，Huang 等人^[33]提出將拉脹材料包覆空心鋼柱的 Lamb 波地震超材料設計。模擬結果發現，若以長寬 10 公尺、深度 20 公尺的拉脹材料包覆長寬 8.5 公尺的空心鋼柱，其可提供 0.515 ~ 6.070 Hz 的帶隙。同年，Li 等人^[34]提出以矩形、T 形及 I 形對 Z 軸旋轉一圈的地震超材料，並埋入土壤中且與矩形斷面的地震超材料進行比較。在 Rayleigh 波的模擬中，矩形的旋轉地震超材料相對於無旋轉的帶隙頻率有很明顯的下降，且帶寬也有增加的趨勢；在 Lamb 波的模擬中，若將地震超材料旋轉一圈，則帶隙也有下降的趨勢。在時域方面，以五層矩形旋轉地震超材料包覆測量點，並輸入地震歷時資料，其中可以衰減超過 50% 的地表加速度，頻域上帶隙內振幅也有很明顯的衰減。同年，Zhang 等人^[35]提出在土壤中埋入十字形、矩形的鋼柱地震超材料，分別探討實心與空心對帶隙的影響。在數值模擬中以無限域分析地震超材料模型，並週期性條件模擬地震超材料對 Lamb 波的帶隙。根據數值結果，帶隙是由布拉格散射所產生，且對於兩種幾何實心地震超材料，可以提供較大範圍的帶寬與較低頻的帶隙。

在 2022 年，Amanat 等人^[36]在圓柱混凝土的基礎上，提出埋入方形空心混凝土樁的地震超材料，並指出在相同體積下，該地震超材料藉由提升剪切變形的勁度，不僅可保留圓柱形地震超材料將 Rayleigh 波（第一、三模態）轉至體波的性能，也可以將 Love 波（第二、四模態）轉至體波，進而提升帶隙的範圍。在數值模擬中，方形空心混凝土地震超材料可以提供 20 Hz 以下的帶隙，但對於 3 Hz 以下的超低頻震動無法提供較好的減震效果，不過可以藉由增加地震超材料數目，或是增加的埋入深度提升衰減率。同年，Maheshwari 與 Rajagopal^[37]提出在土壤埋入深度 2.5 公尺的圓鋼樁，且在深度 2.5 公尺處向下埋入厚度 0.5 公尺的混凝土塊，利用混凝土塊與土壤之產生互制，形成類似將樁打入岩盤中的效果，使 Rayleigh 波轉至體波，藉此產生零頻帶隙。在數值模擬中，分別以正方形晶格、蜂巢晶格及六角形晶格的週期性條件模擬地

震超材料，其中六角形晶格可以提供 0 ~ 1.15 Hz 的帶隙。此外，三者皆可以將 20 Hz 以下的 Rayleigh 波轉至體波。同年，Su 與 Wu^[38]提出雪人型地震超材料設計，指出其相比於文獻上表現最好的單一材料的地上型共振器 - T 型地震超材料，雪人的幾何形狀能產生更低頻的帶隙。在 2023 年，Su 與 Wang^[39]設計容易製作的 V 型與 N 型地震超材料，並使用高度漸增的方式拓寬地震超材料的帶隙。

研究目的

目前地震超材料設計普遍採用特殊的幾何與材料達到期望的低頻帶隙，在實際量產與維護上可能稍有困難。因此本文以常見的土木材料、元件以及簡單的幾何為基礎，提出了新穎的地震超材料設計。

地震超材料模型

圖 4 為本研究提出之消波塊型地震超材料單元，其由一個消波塊以及嵌上半徑 0.3 公尺半球的圓板組成，圓板的厚度為 0.3 公尺，半徑 0.9 公尺。

圖中灰色區域為混凝土材料，質量密度為 2,500 kg/m³，楊氏係數 30 GPa，蒲松比 0.25，咖啡色部分為土壤，質量密度設為 1,800 kg/m³，楊氏係數 20 MPa，蒲松比 0.3。地震超材料單元的尺寸列於表 1。

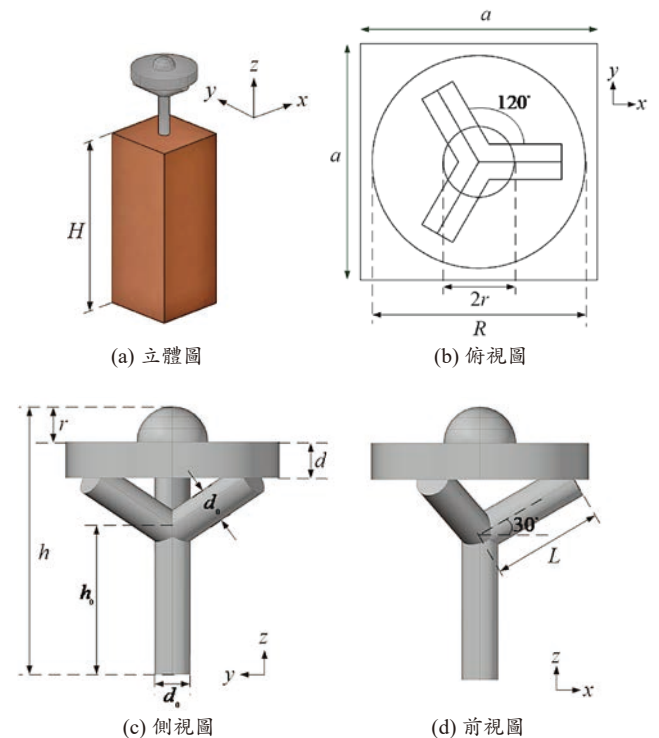


圖 4 本研究提出的消波塊地震超材料模型

表 1 本研究提出的消波塊地震超材料模型尺寸表

a	2 m
d	0.3 m
d_0	0.3 m
h	2.25 m
h_0	1.2 m
H	100 m
L	0.9 m
r	0.3 m
R	0.9 m

頻散圖與對應之振動模態

我們將地震超材料模擬正方晶格的排列進行週期性的配置，根據 Bloch 定理^[40]，頻散分析時可取一最小不重複單元，並於其周圍施加週期性邊界。二維週期性結構的掃頻範圍可應用布里淵區^[41]，將掃頻路徑簡化為 $\Gamma \rightarrow X \rightarrow M \rightarrow \Gamma$ ，如圖 5 所示，即可求得頻散圖。我們利用有限元素法軟體 COMSOL Multiphysics 進行上述頻散分析，其網格資料列於表 2。

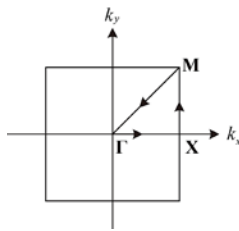


圖 5 掃頻路徑：最簡布里淵區

表 2 頻散分析網格資料

最大元素尺寸	最小元素尺寸	最大元素成長率	曲率因子	狹區解析度
2.52	0.0225	1.3	0.25	0.9

圖 6 為頻散分析後的結果。由於本研究專注於表面波，體波不在探討範圍內，因此，我們利用 Sound cone^[42] 將體波部分以藍色區域蓋住。頻散圖中有兩個低頻帶隙：0.58 ~ 1.26 Hz 與 8.30 ~ 10.66 Hz，可用於阻隔地震的表面波。為探討帶隙產生的原因，圖 7 顯示頻散圖中每條通帶（Passing Band）對應的共振模態。

圖 7 中的模態 A 為左右傾倒，模態 B 為前後傾倒，由於模型的對稱性，左右與前後傾倒的自然振動頻率重合，造成模態 A 與 B 的頻散曲線完全重合。模態 C 為上下伸縮；模態 D 為收縮膨脹與旋轉模態的耦合；模態 E 與 F 為基座在不同方向的擺盪；模態 G 為淺層土壤振動。在阻隔地震表面波的帶隙中，第一帶隙由模型的傾倒與上下伸縮模態的頻率差所產生：0.58

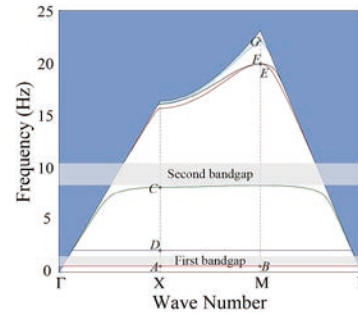


圖 6 頻散圖

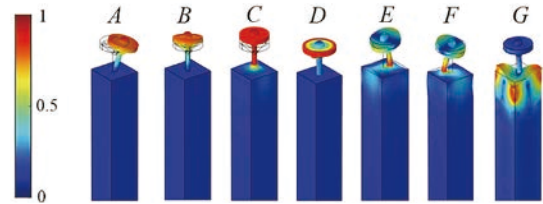


圖 7 頻散圖對應之共振模態

~ 1.26 Hz，第二帶隙則由模型的上下伸縮與基座擺盪的頻率差產生：8.30 ~ 10.66 Hz。

全域暫態模擬

由於頻散圖的計算原理是將無限多個地震超材料單元以週期性排列的方式得出，而實際應用上使用的地震超材料單元數目為有限個，因此，藉由以下的暫態模擬，我們可探討有限個地震超材料單元對波傳的影響。我們先建立暫態全域模型，並使用由頻散圖得出的帶隙，轉換成特定函數作為波源函數輸入至模型中，分別以無地震超材料模型與有地震超材料模型進行暫態模擬，以驗證帶隙的存在與其對於波傳能量的衰減效果。

我們利用兩個高斯波包函數（Gaussian Wave Packet）組合做為位移點波源的輸入函數，調整參數使其頻域內含恰為消波塊型地震超材料的兩個帶隙區間：

$$u(t) = e^{-\left(\frac{t-t_{s1}}{t_1}\right)^2} \sin(2\pi f_1(t-t_{s1})) + e^{-\left(\frac{t-t_{s2}}{t_2}\right)^2} \sin(2\pi f_2(t-t_{s2}))$$

其中， $t_{s1} = 6.52 \text{ sec}$, $t_1 = 2.5 \text{ sec}$, $f_1 = 0.92 \text{ Hz}$, $t_{s2} = 6.86 \text{ sec}$, $t_2 = 0.5 \text{ sec}$, $f_2 = 9.48 \text{ Hz}$ 。

圖 8 顯示此位移點波源的時域與頻域反應。圖 8(a) 含有兩個高斯波包函數，主導波型的為中心頻率在 $f_1 = 0.92 \text{ Hz}$ 的高斯波包函數，而中央顏色較深的高頻部分，為中心頻率在 $f_2 = 9.48 \text{ Hz}$ 的高斯波包函數所造成。圖 8(b) 為圖 8(a) 經由快速傅立葉轉換（Fast Fourier Transform）轉至頻率域的結果。由圖可觀察此輸入函數除了在兩個頻段有值之外，其他的頻域反應

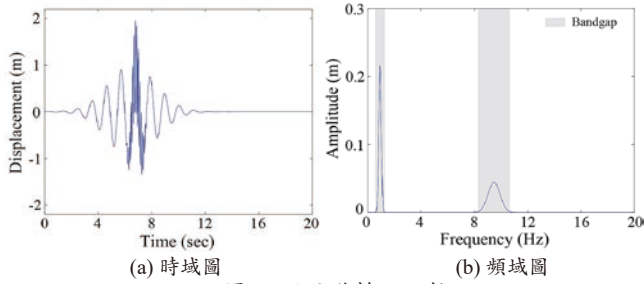


圖 8 點位移輸入函數

幾乎為零。此兩頻率範圍恰為消波塊型地震超材料的帶隙區間。圖 8(b) 的灰色區間為圖 6 的頻散分析求得之帶隙區間：0.58 ~ 1.26 Hz 及 8.30 ~ 10.66 Hz。

圖 9 為本研究建立的暫態全域模型，其中，土壤長度為 100 m、寬度 20 m、深度 100 m，其深度確保波傳可將 Rayleigh 波與 Lamb 波區隔。我們將消波塊型地震超材料單元以 5 列 10 行的正方晶格排列，並使用圖 8(a) 的波源函數以點位移的方式在表面進行垂直向振動，使表面波往各方向傳遞。點波源設定距離地震超材料陣列 56 m 處，其距離可確保陣列的局部共振由表面波產生，而接收點則設置在陣列後方 4 m 處。接著，為了避免反射波影響結果，在模型底部與四邊設為低反射邊界，並將暫態模擬時間設置為 20 sec，時間步階則設置為 0.001 sec，網格切割資訊如表 3。最後由 COMSOL Multiphysics 提供的隱式廣義 alpha 進行數值積分 [43]。

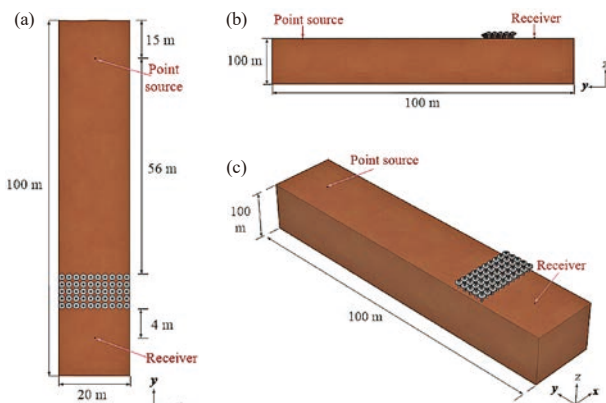


圖 9 全域暫態模型：(a) 俯視圖、(b) 側視圖、(c) 立體圖

表 3 暫態分析網格資訊

最大元素尺寸	最小元素尺寸	最大元素成長率	曲率因子	狹區解析度
4	0.07	1.4	0.1	1

圖 10(a) 為由 COMSOL Multiphysics 進行全域暫態模擬後，由接收點獲取 z 方向位移值的結果。圖 10(b) 為以圖 10(a) 之數值由快速傅立葉轉換所得之頻域資料。從時域圖可以看出相對於無超材料，有超材料的

接收點 z 方向位移有很明顯的衰減。無超材料時，時域的 z 方向位移最大值為 4.6 mm，加入 5 列的地震超材料後，z 方向位移最大值變為 2.5 mm，衰減值達 45.22%。須注意由於此衰減值會隨著地震超材料擺放的排數增多而增加，若欲達到更多的地震波衰減，可增加擺放的地震超材料數量，然而，增加超材料的擺放數量亦會需要更多的空間作為代價。我們由圖 10(b) 的頻域響應也可發現表面波的振幅在帶隙範圍內有明顯的衰減，驗證實消波塊型地震超材料可阻擋 0.58 ~ 1.26 Hz 與 8.30 ~ 10.66 Hz 的表面波。其中，由於 0.58 ~ 1.26 Hz 的地震表面波波長較長，衰減效果並不明顯，此現象可透過增加地震超材料的數量改善。

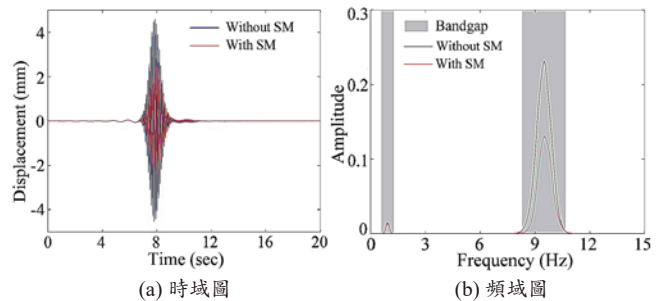


圖 10 暫態模擬結果

結論

本研究應用超材料局部共振時可阻擋特定頻率的概念，發展土木規模的消波塊型地震超材料。此地震超材料設計以常見的消波塊為主體，於其上加入圓板與半圓球，達成阻隔低頻地震波的目的。由於所有製作的材料均為混凝土，相較於現有文獻的地震超材料設計，消波塊型地震超材料在成本上較為廉價，具備市場競爭力。本研究利用有限元素模擬分析阻隔地震波的帶隙區間，其中第一帶隙由模型的傾倒與上下伸縮模態的自然頻率差所產生：0.58 ~ 1.26 Hz，第二帶隙由模型的上下伸縮與基座擺盪的自然頻率差產生：8.30 ~ 10.66 Hz。藉由全域暫態分析，我們驗證消波塊型地震超材料能夠阻擋 0.58 ~ 1.26 Hz 和 8.30 ~ 10.66 Hz 的地震表面波。

本研究提出的地震超材料設計使用有限元素法進行分析，未來預計先進行縮尺模型實驗，驗證其波衰減效果，再進行全尺寸的現地試驗，以期將地震超材料的研究推展至實務面，與現有的地震工程隔減震技術相互補足。

誌謝

本研究承蒙科技部 112 年度「地震超材料結構的隔減振屏蔽：理論架構、數值模擬及實驗」地震超材料

的設計與分析」研究計畫惠予補助，計畫編號：MOST 110-2221-E-006 -056 -MY3，特此申謝。

參考文獻

- 中央氣象局地震測報中心網站 <https://scweb.cwb.gov.tw/zh-TW/Guidance/FAQdetail/55> (last visited 2023/8/14).
- Li, J., Zhang, H., Chen, S., and Zhu, D., "Optimization and sensitivity of TMD parameters for mitigating bridge maximum vibration response under moving forces," *Structures*, Vol. 28, pp. 512-520 (2020).
- Chen, Z., Fang, H., Han, Z. and Sun, S., "Influence of bridge-based designed TMD on running trains," *Journal of Vibration and Control*, Vol. 25, pp. 182-193 (2019).
- 蘇于琪、汪向榮、張文忠、林子剛、林正洪、吳東諭、張國鎮、陳東陽，「地震超材料的隔減震技術」，*結構工程期刊*，第三十七卷，第三期，第66-80頁(2022)。
- Qahtan, A.S., Huang, J., Amran, M., Qader, D. N., and Fediuk, R., "Seismic composite metamaterial: a review," *Journal of Composites Science*, Vol. 6, pp. 348 (2022).
- Holliman Jr, J.E., Schaeff, H.T., McGrail, B.P., and Miller, Q.R., "Review of foundational concepts and emerging directions in metamaterial research: design, phenomena, and applications," *Materials Advances*, Vol. 3, pp. 8390-8406 (2022).
- Liu, Z., Zhang, X., Mao, Y., Zhu, Y., Yang, Z., Chan, C.T., and Sheng, P., "Locally resonant sonic materials," *Science*, Vol. 289, pp. 1734-1736 (2000).
- Wikipedia: seismic wave. https://en.wikipedia.org/wiki/Seismic_wave (last visited 2023/8/14).
- The guided wave innovation company: plates and shells. <http://www.gwultrasonics.com/knowledge/plateshell/> (last visited 2023/8/14).
- Brülé, S., Enoch, S., and Guenneau, S., "Emergence of seismic metamaterials: current state and future perspectives," *Physics Letter A*, Vol. 384, pp. 126034 (2019).
- Richart, F.E., Hall, F.J.R., and Woods, R.D., "Vibrations of soils and foundations," Prentice-Hall (1970).
- Alagoz, B.B. and Alagoz, S., "Towards earthquake shields: a numerical investigation of earthquake shielding with seismic crystals," *Open Journal of Acoustics*, Vol. 1, pp. 63-69 (2011).
- Finocchio, G., Casablanc, O., Ricciardi, G., Alibrandi, U., Garesci, F., Chiappini, M., and Azzeroni, B., "Seismic metamaterials based on isochronous mechanical oscillators," *Applied Physics Letters*, Vol. 104, pp. 191903 (2014).
- Yan, Y., Cheng, Z., Menq, F., Tang, Y., and Shi, Z., "Three dimensional periodic foundations for base seismic isolation," *Smart Materials and Structures*, Vol. 24, pp. 075006 (2015).
- Colombi, A., Colquitt, D., Roux, P., Guenneau, S., and Craster, R.V., "A seismic metamaterial: the resonant metawedge," *Scientific Reports*, Vol. 6, pp. 27717 (2016).
- Colombi, A., Roux, P., Guenneau, S., and Craster, R.V., "Forests as a natural seismic metamaterial: Rayleigh wave bandgaps induced by local resonances," *Scientific Reports*, Vol. 6, pp. 1-7 (2016).
- Miniaci, M., Krushynska, A., Borgia, F., and Pugno, N.M., "Large scale mechanical metamaterials as seismic shields," *Journal of Physics*, Vol. 18, pp. 083041 (2016).
- Palermo, A., Krödel, S., Marzani, A., and Daraio, C., "Engineered metabarrier as shield from seismic surface waves," *Scientific Report*, Vol. 6, pp. 1-10 (2016).
- Achaoui, Y., Ungureanu, B., Enoch, S., Brülé, S., and Guenneau, S., "Seismic waves damping with arrays of inertial resonators," *Extreme Mechanics Letters*, Vol. 8, pp. 30-37 (2016).
- D'Alessandro, L., Belloni, E., Ardito, R., Braghin, F., and Corigliano, A., "Mechanical low frequency filter via modes separation in 3D periodic structures," *Applied Physics Letters*, Vol. 111, pp. 231902 (2017).
- Du, Q., Zeng, Y., Huang, G., and Yang, H., "Elastic metamaterial-based seismic shield for both Lamb and surface waves," *AIP Advances*, Vol. 7, pp. 075015 (2017).
- Achaoui, Y., Antonakakis, T., Brülé, S., Craster, R.V., Enoch, S., and Guenneau, S., "Clamped seismic metamaterials: ultra low frequency stop bands," *New Journal of Physics*, Vol. 19, pp. 063022 (2017).
- Zeng, Y., Xu, Y., Deng, K., Zeng, Z., Yang, H., Muzamil, M., Du, Q., "Low-frequency broadband seismic metamaterial using I-shaped pillars in a half-space," *Journal of Applied Physics*, Vol. 123, pp. 214901 (2018).
- Du, Q., Zeng, Y., Xu, Y., Yang, H., and Zeng, Z., "H-fractal seismic metamaterial with broadband low-frequency bandgaps," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 51, pp. 105104 (2018).
- Cheng, Z.B. and Shi, Z.F., "Composite periodic foundation and its application for seismic isolation," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 47, pp. 925-944 (2018).
- Pu, X. and Shi, Z., "Surface-wave attenuation by periodic pile barriers in layered soils," *Construction and Building Materials*, Vol. 180, pp. 177-187 (2018).
- Chen, Y., Qian, F., Scarpa, F., Zuo, L., and Zhuang, X., "Harnessing multi-layered soil to design seismic metamaterials with ultralow frequency band gaps," *Materials & Design*, Vol. 175, pp. 107813 (2019).
- Zeng, Y., Xu, Y., Deng, K., Peng, P., Yang, H., Muzamil, M., and Du, Q., "A broadband seismic metamaterial plate with simple structure and easy realization," *Journal of Applied Physics*, Vol. 125, pp. 224901 (2019).
- Muhammad, Lim, C.W., and Reddy, J.N., "Built-up structural steel sections as seismic metamaterials for surface wave attenuation with low frequency wide bandgap in layered soil medium," *Engineering Structures*, Vol. 188, pp. 440-451 (2019).
- Muhammad and Lim, C.W., "Elastic waves propagation in thin plate metamaterials and evidence of low frequency pseudo and local resonance bandgaps," *Physics Letters A*, Vol. 383, pp. 2789-2796 (2019).
- 李冠慧、汪向榮、蘇于琪、游忠翰、張國鎮、陳東陽，「地震超材料設計之減震分析及效益評估」，*中國土木水利工程學刊*，第三十二卷第七期，第597-607頁(2020)。
- Zeng, Y., Xu, Y., Yang, H., Muzamil, M., Xu, R., Deng, K., Peng, P., and Du, Q., "A Matryoshka-like seismic metamaterial with wide band-gap characteristics," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 185, pp. 334-341 (2020).
- Huang, T.T., Ren, X., Zeng, Y., Zhang, Y., Luo, C., Zhang, X.Y., and Xie, Y.M., "Based on auxetic foam: A novel type of seismic metamaterial for Lamb waves," *Engineering Structures*, Vol. 246, pp. 112976 (2021).
- Li, L., Jia, Q., Tong, M., Li, P., and Zhang, X., "Radial seismic metamaterials with ultra-low frequency broadband characteristics," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 54, pp. 505104 (2021).
- Zhang, K., Luo, J., Hong, F., and Deng, Z., "Seismic metamaterials with cross-like and square steel sections for low-frequency wide band gaps," *Engineering Structures*, Vol. 232, pp. 111870 (2021).
- Amanat, S., Rafiee-Dehkharghani, R., Bitaraf, M., and Bansal, D., "Analytical and numerical investigation of finite and infinite periodic lattices for mitigation of seismic waves in layered grounds," *International Journal of Engineering Science*, Vol. 173, pp. 103655 (2022).
- Maheshwari, H.K. and Rajagopal, P., "Novel locally resonant and widely scalable seismic metamaterials for broadband mitigation of disturbances in the very low frequency range of 0-33 Hz," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 161, pp. 107409 (2022).
- Su, Y.C. and Wu, C.K., "A snowman-like seismic metamaterial," *Journal of Applied Physics*, Vol. 132, pp. 105106 (2022).
- Su, Y.C. and Wang, S.S., "Gradient V-Shaped and N-Shaped seismic metamaterials," *Materials*, Vol. 16, pp. 3074 (2023).
- Bloch, F., "Über die quantenmechanik der elektronen in kristallgittern," *Zeitschrift für Physik*, Vol. 52, pp. 555-600 (1929).
- Brillouin, L., "Wave propagation in periodic structures," Dover Publications (2003).
- Khelif, A., Achaoui, Y., Benchabane, S., Laude, V., and Aoubiza, B., "Locally resonant surface acoustic wave band gaps in a two-dimensional phononic crystal of pillars on a surface," *Physical Review B*, Vol. 81, pp. 214303 (2010).
- COMSOL, BDF, Generalized Alpha, and Runge-Kutta Methods. <https://www.comsol.com/support/knowledgebase/1062> (Last visited 2023/7/7).